DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170131

蔡宇杰, 乔玉辉, 徐敬, 孟凡乔, 吴文良. 有机和常规苹果生产环境影响的生命周期评价[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1527−1534
Cai Y J, Qiao Y H, Xu J, Meng F Q, Wu W L. Environmental impact assessment via life cycle analysis for organic and conventional apple productions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(10): 1527−1534

有机和常规苹果生产环境影响的生命周期评价*

蔡宇杰, 乔玉辉, 徐　敬, 孟凡乔**, 吴文良

(中国农业大学资源与环境学院　北京　100193)

摘　要: 本文以我国园艺产业中的重要果品——苹果的生产为研究对象, 通过实地调研, 采用生命周期评价方法, 对山西浮山、陕西白水和甘肃天水等 3 个代表性地区的有机及常规苹果生产的环境影响进行了研究, 以期为我国农业可持续发展和生态文明建设提供科学依据。结果表明, 山西浮山的有机苹果生产养分利用效率高于常规苹果, 陕西白水和甘肃天水相反。3 个地区单位苹果有机生产方式的能源消耗均占常规方式的 26%以下, 有机生产的能量利用效率高于常规生产。在能源消耗、全球变暖、环境酸化以及富营养化等 4 类环境影响中, 富营养化对环境影响的贡献最大, 均占 80%以上。有机和常规苹果生产的环境影响按照大小均表现为陕西白水>甘肃天水>山西浮山。由于山西浮山有机苹果的肥料等投入远低于常规苹果生产, 产量相差不大, 因而表现为有机苹果的综合环境影响仅为常规苹果的 22%; 陕西白水和甘肃天水呈现相反的情形, 其有机苹果的综合环境影响分别是常规苹果的 356%和 138%。在高量有机养分投入的前提下, 有机农业可以达到和常规农业相当的作物产量, 但其代价是较高的负面环境影响和较低的养分和能源利用效率。

关键词: 有机农业; 苹果; 生命周期评价; 环境影响; 养分利用效率; 能源利用效率; 富营养化
中图分类号: X820.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1671-3990(2017)10-1527-08

Environmental impact assessment via life cycle analysis for organic and conventional apple productions*

CAI Yujie, QIAO Yuhui, XU Jing, MENG Fanqiao**, WU Wenliang

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: To set the scientific basis for sustainable agricultural development and ecological civilization construction in China, this study analyzed the impacts of organic and conventional apple productions on environment in Fushan of Shanxi Province, Baishui of Shaanxi Province and Tianshui of Gansu Province through life cycle analysis method. Data were collected via field visits and farmer interviews. The study used unit apple production as the basis for comparative analysis. The system boundary of apple production defined in the study included materials production and cropping stages. The impacts of apple production on environments were assessed at four aspects — energy consumption, global warming, environmental acidification and eutrophication. It was found that nutrient use efficiency in organic apple production in Fushan of Shanxi Province was higher than that in conventional apple production, which was the reverse of the results for Baishui of Shaanxi Province and Tianshui of Gansu Province. The yield of organic apple was similar to that of conventional apple in Baishui of Shaanxi Province and

* "十三五"国家重点研发计划(2016YFD0201204)和"十二五"国家科技支撑项目(2014BAK19B05)资助
** 通讯作者: 孟凡乔, 主要研究方向为土壤碳氮循环和有机农业。E-mail: mengfq@cau.edu.cn
蔡宇杰, 主要研究方向为有机农业。E-mail: 635775355@qq.com
收稿日期: 2017-02-16　接受日期: 2017-06-26
* This study was funded by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0201204) and the National Key Technologies R & D Program of China (2014BAK19B05).
** Corresponding author, E-mail: mengfq@cau.edu.cn
Received Feb. 16, 2017; accepted Jun. 26, 2017

Tianshui of Gansu Province, while the yield of organic apple in Fushan of Shanxi Province was only 69% that of conventional apple. Nitrogen, phosphorous and potassium inputs in organic apple production in Fushan of Shanxi Province were 6.8%–18.8% those of conventional apple production. For the other two regions, however, nutrient input in organic production was about 72.7%–228.8% that of conventional production. Energy consumption per unit organic apple product in the three regions accounted for less than 26% of the conventional product; i.e., energy utilization efficiency of organic apple was higher than that of conventional apple. Among the four environmental impacts (energy consumption, global warming, environmental acidification and eutrophication), eutrophication contributed the most (over 80%) to total environmental impact. The impact of global warming for unit organic apple product in Fushan of Shanxi Province was smaller than that of conventional product (organic product was only 23% that of conventional product). However, organic apple production in Baishui of Shaanxi Province and Tianshui of Gansu Province was much higher than that of conventional production (organic apple was respectively 356% and 138% conventional apple for the two areas). Environmental acidification and eutrophication under organic apple production in Fushan of Shanxi Province was lower than that under conventional production, but the results for Tianshui of Gansu Province and Baishui of Shaanxi Province were the reverse. Total environmental impact of apple production was the highest in Baisui of Shaanxi Province, followed by Tianshui of Gansu Province and then Fushan of Shanxi Province. Total environmental impact of organic apple production was 22% that of conventional apple production in Fushan of Shanxi Province. Then in Baishui of Shaanxi Province and Tianshui of Gansu Province, total environmental impacts of organic apple production were respectively 356% and 138% those of conventional apple production. This discrepancy was mainly due to differences in the amount and types of fertilizer used. The results showed that organic production had crop yields comparable to those of conventional agriculture in terms of nutrient input. However, it also led to higher negative environmental impacts and lower nutrient and energy use efficiency in organic production.
Keywords: Organic agriculture; Apple; Life cycle assessment; Environmental impact; Nutrient use efficiency; Energy use efficiency; Eutrophication

农业生产系统会导致广泛的环境影响(如气候变化、酸化、富营养化等)，受自然条件和生产方式的影响，不同地区农业生产的环境影响变异很大，不同生产方式和产品也相差很大。越来越多的研究对不同类型农产品和不同生产方式的综合环境影响进行分析，其中生命周期评价(life cycle analysis, LCA)方法，分析所有涉及生产系统因素的环境影响，正越来越多地被人们采用[1]。1996 年，国际标准化组织发布了 ISO14040(原则及框架), 2000 年发布 ISO14042(影响评价)[2]，并对工业、农业领域确定了各自的分析框架和方法[3-4]，这对于农业领域开展 LCA 评价提供了方法学方面的支撑。农作物生产所产生的环境影响不仅包括农业活动自身，也涉及农业投入品的环境影响，如肥料生产环节造成的污染物排放和资源消耗[5]，因此 LCA 方法也逐渐应用到农业生产系统，如有机和常规农业的环境影响评价。应用 LCA 方法，我国学者进行了很多研究，王效琴等[6]对设施蔬菜，王明新等[7]对华北平原冬小麦(*Triticum aestivum*)，徐杰锋等[8]对香蕉(*Musa nana*)种植的环境影响都进行了评估。

由于生产过程以及投入品的不同，有机农业和常规农业呈现出不同的环境效益。如 Meng 等[9]对中国有机农业环境影响的定量研究表明，有机农业在降低硝酸盐污染、固碳减排和生物多样性改善等方面具有更好的环境效益，其价值可以补偿相当一部分产量降低的经济损失。罗燕等[10]运用 LCA 评价方法，发现有机大豆(*Glycine max*)的环境影响综合指数小于常规大豆，其中资源消耗、酸化和全球变暖占综合环境影响的30%左右，而富营养化和生态毒性的贡献较低。李彩恋等[11]对有机和常规草莓(*Fragaria ananassa*)进行了生命周期评价，发现有机草莓生产对环境带来的影响更小，主要是由于有机草莓生产过程中施用的有机肥与生物源农药对环境产生的影响较小所致。除了生产过程和投入品，不同地区农产品的环境影响也受到自然条件和管理措施的影响，如李贞宇等[12]发现，富营养化是最重要的环境影响，农户间变异较大，由于自然条件等使得吉林省具有资源环境影响较低的优势。在 LCA 分析中，环境影响的单位可以采用单位面积，也可以采用单位作物产量，其经济和社会学含义是完全不同的。到目前为止，这些研究大都针对某一地区有机或常规产品的环境影响进行分析，而对于不同地区有机和常规产品的环境影响比较研究开展得较少，因此本文选取我国园艺生产中重要的果品——苹果(*Malus domestica*)，分析其在不同地区、有机和常规生产方式下的环境影响，以期为我国农业可持续发展和生态文明建设提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究对象与数据来源

本研究的研究区域为山西浮山、陕西白水、甘肃天水，选取 3 个地区的有机和常规农业的苹果生产。本文的有机生产方式是指遵照特定的农业生产原则，在生产中不采用基因工程获得的生物及其产物，不使用化学合成的农药、化肥、生长调节剂、饲料添加剂等物质，遵循自然规律和生态学原理，协调种植业和养殖业的平衡，采用一系列可持续发展的农业技术以维持持续稳定的农业生产体系的一种农业生产方式[13]。通过现场调查的方式，从当地有机生产和附近的常规生产企业获得苹果生产的相关数据。山西浮山调研地点为浮山市浮山县中宝农业开发有限责任公司，该公司拥有苹果有机种植面积 29.95 hm^2。陕西白水调研地点为陕西省白水县宏达果业有限责任公司，苹果有机种植面积为 533.3 hm^2。甘肃天水调研地点为陇南长城果汁饮料有限公司，苹果有机种植面积为 400 hm^2。调查的常规苹果生产面积与有机苹果类似。山西浮山年平均气温 11.2 ℃，降水量 532.7 mm，土壤类型为褐土。陕西白水历年平均气温 11.4 ℃，平均降水量 568 mm，境内土壤多属黄土母质，公司农场土壤为褐土。甘肃天水年平均气温 11.0 ℃，年平均降水量 491.7 mm，土壤类型为黄土。

1.2　生命周期评价

1.2.1　目标定义与范围界定

功能单元是 LCA 环境影响比较的基础，需要对研究目标和相关的功能单元进行明确[14]。本研究以生产 1 t 苹果为评价的功能单元，对 3 个地区的有机和常规苹果生产进行评价。系统起始边界为农资系统生产阶段，终止边界是输出农产品以及污染物排放(图 1)。本文主要考虑苹果生产所产生的能源消耗(RU)、全球变暖潜力(GWP)、环境酸化潜力(AP)、富营养化潜力(EP)等 4 方面的环境影响。

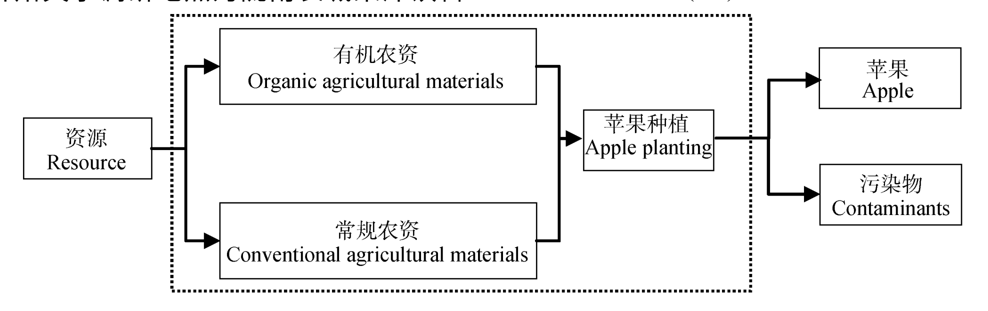


图 1　有机及常规苹果生产生命周期评价系统界定

Fig. 1　Life cycle analysis system boundaries of organic and conventional apple productions

1.2.2　清单分析

清单分析是生命周期评价的核心环节，能够清晰有效地将系统边界以内与功能单元相关的所有资源投入以及物质产出量化。本文核心内容为农业生产过程及其产生的环境影响分析。由于农业系统拥有众多的子系统，实际分析中通过对子系统的独立分析更为实际可行[15]。由于本文涉及的农药在常规农业生产中使用量较小，且我国没有有关农药的环境影响生命周期清单，本文中没有计算农药的排放及毒性污染。

本文采用的计算方法是先将数据进行特征化处理，之后进行标准化处理，最后加权处理后得到环境影响综合评价。特征化过程是将同一项目中，不同影响的指标分类转化成统一的单位。本文采用的是当量因子法，原理是利用不同环境胁迫因子(在质量相同的情况下)对同一种环境影响类型的贡献差异，以其中某一种胁迫因子为基准，把其影响潜力看作 1，然后将等量的其他污染物与其比较，这样就可以得到各类胁迫因子相对于基准物的影响潜力大小，即当量系数，最后可根据各胁迫因子间的当量关系，汇总得到以基准物质 f 为单位的影响潜力大小。这种方法的优势在于它是建立在科学研究基础上，同一种胁迫因子，无论暴露途径、暴露地点等条件如何不同，但它所能产生的潜在环境影响都认为是一样的。因此其结果不受时间和地理因素的影响[16]。

本文主要考虑全球变暖潜力(GWP)、能源消耗(RU)、环境酸化潜力(AP)、富营养化潜力(EP)等 4 类环境影响。全球变暖潜力以 CO_2 为参照(以 CO_2 当量计)，CH_4 和 N_2O 的当量系数分别为 21 和 310[17]。环境酸化潜力以 SO_2 为参照物，NH_3 和 NO_x 的当量系数分别为 1.88 和 0.7；富营养化潜力以 PO_4^- 为系数，NO_x、NO_3^-、NH_3 的当量系数分别为 0.13、0.42 和 0.33[18]。

标准化过程主要是建立标准化基准，使各种环境影响类型能够具有相对可比性。环境影响评价需要对所得到的数据进行综合评价，得到环境影响评

价综合指数，从而提供一个可比较的评价结果。不同的环境影响类型对自然资源的可持续利用、生态系统以及人类健康具有不同的相对重要性，因此需要对它们进行权重划分。具体的基准值和权重系数见表 1。依据的基准值为 2000 年世界人均值，标准化计算方法为特征化结果除以基准值[19]，表中基准值均为人均值。加权评估依据籍春蕾等[20]设置的权重系数。

表 1 不同类型环境影响的标准化基准及权重系数

Table 1 Normalized values and weight coefficients for different environmental impacts

环境影响类型 Environmental impact	单位 Unit	基准值 Reference value	基准年 Base year	地域类型 Region type	权重系数 Weight coefficient
不可再生资源 Unrenewable resources	$MJ\cdot a^{-1}$	2 590 457	2000	全球 Global	0.28
全球变暖 Global warming	$kg(CO_2\ eq)\cdot a^{-1}$	6 869	2000	全球 Global	0.23
环境酸化 Environmental acidification	$kg(SO_2\ eq)\cdot a^{-1}$	56.26	2000	全球 Global	0.26
富营养化 Eutrophication	$kg(PO_4\ eq)\cdot a^{-1}$	1.90	2000	全球 Global	0.23

调研发现，山西浮山的有机苹果主要供出口，为保障风味施用有机肥数量较少，为 5 250 $kg\cdot hm^{-2}$；常规苹果生产施用有机肥 12 750 $kg\cdot hm^{-2}$，专用复合肥 3 375 $kg\cdot hm^{-2}$，有机肥中 N、P_2O_5、K_2O 的含量分别为 1.92%、0.61%、1.13%，专用复合肥中 N、P_2O_5、K_2O 含量均为 15%。陕西白水有机苹果使用有机肥 180 $t\cdot hm^{-2}$；常规苹果生产使用专用复合肥 4 500 $kg\cdot hm^{-2}$，有机肥 N、P_2O_5、K_2O 的含量为 0.85%、0.27%、0.73%，专用复合肥 N、P_2O_5、K_2O 的含量均为 15%。甘肃天水有机苹果生产施用有机肥 45 $t\cdot hm^{-2}$，有机肥 N、P_2O_5、K_2O 含量为 2.17%、0.70%、1.95%；常规生产使用专用复合肥 450 $kg\cdot hm^{-2}$，有机肥 45 $t\cdot hm^{-2}$，有机肥 N、P_2O_5、K_2O 含量为 1.38%、0.32%、1.42%，专用复合肥 N、P_2O_5、K_2O 含量均为 15%。

本文参考籍春蕾等[20]的数据，有机农业的农资系统污染物排放主要来自有机肥堆肥发酵阶段产生的 CH_4、NO_2 和 NH_3，分别为 0.648 $g\cdot kg^{-1}$、0.045 $g\cdot kg^{-1}$ 和 0.961 $g\cdot kg^{-1}$；消耗的能源主要为粪便收集、加工和运输过程消耗的能源，生产含 1 t 纯氮的有机肥能源消耗为 11.43 Gj。常规农业的农资系统排放物主要来自化肥的生产加工过程，参考梁龙等[18]的研究数据，见表 2。

表 2 单位化肥生产的环境影响的生命周期清单

Table 2 Life cycle analysis list for environmental impacts of manufacturing of per unit chemical fertilizer

肥料 Fertilizer	能量消耗 Energy consumption ($MJ\cdot kg^{-1}$)	污染物排放 Pollutant emission [$g\cdot kg^{-1}$(fertilizer)]					
		CO ($g\cdot kg^{-1}$)	NO_x ($g\cdot kg^{-1}$)	N_2O ($g\cdot kg^{-1}$)	NH_3 ($g\cdot kg^{-1}$)	SO_x ($g\cdot kg^{-1}$)	CH_4 ($g\cdot kg^{-1}$)
N	92.024	4.255	35.400	0.173	2.739	31.895	0.241
P_2O_5	20.958	0.874	4.618	0.018	—	7.609	0.021
K_2O	13.130	0.805	6.208	0.027	—	1.576	0.044

计算种植系统的能源消耗和污染物排放时，本文参考的相关文献排放系数为：氮表观淋失为 0.021 9 $kg\cdot kg^{-1}$，NH_3 挥发损失为 0.112 $kg\cdot kg^{-1}$，N_2O 损失为 0.010 $kg\cdot kg^{-1}$[21-22]。

2 结果与分析

2.1 肥料养分投入及能耗分析

基于调研结果所得数据，可以计算得到有机及常规苹果生产的肥料投入情况(表 3)。山西临汾的有机苹果产量为常规苹果产量的 69%，而陕西白水和甘肃天水的有机持平或略高于常规苹果产量。山西浮山单位产量有机苹果的养分投入量(养分利用效率的倒数)远低于常规生产，而陕西白水和甘肃天水则是有机高于常规(陕西白水的 P 素除外)，说明山西浮山有机生产的养分利用效率高于常规生产，甘肃天水和陕西白水都是有机低于常规生产。对 3 地的养分利用效率比较发现，不论是有机生产还是常规生产，都是山西浮山>甘肃天水>陕西白水，其中甘肃天水的 P 素除外，其常规生产的利用效率最高。

从表 3 可以看出，在单位产品能耗方面(能量利用效率的倒数)，3 地常规生产方式均高于有机生产方式，山西浮山的有机生产消耗是常规生产的 18%，陕西白水和甘肃天水分别为 26%和 14%，即有机生产方式的能量利用效率高于常规生产。原因在于，化肥生产所需能耗比有机模式的堆肥高出许多，且能耗中肥料能耗又占了最大比重。有机生产

中，单位产品的能耗都表现为甘肃天水<山西浮山<陕西白水，或能量利用效率为甘肃天水>山西浮山>陕西白水。有机模式中，由于陕西白水和山西浮山在人力能耗和灌溉能耗方面远远大于甘肃天水，因此就能量利用效率而言，甘肃天水>山西浮山>陕西白水。常规生产中，能量利用效率为山西浮山>甘肃天水>陕西白水。常规模式中，化肥使用量陕西白水>甘肃天水>山西浮山，而化肥生产占比超过 90%(陕西白水例外，其化肥消耗及灌溉能耗都高于其他两地)。

表 3　不同地区有机和常规苹果产量、单位产品的肥料养分投入和能耗

Table 3　Yield, fertilizer inputs and energy consumption of per unit product for organic and conventional apple productions in different experiment locations

试验地点 Experimental location	生产方式 Cultivation pattern	苹果产量 Apple yield ($kg\cdot hm^{-2}$)	单位产品的肥料养分投入量 Fertilizer input for per unit product ($g\cdot kg^{-1}$) N	P_2O_5	K_2O	单位产品能量消耗 Energy consumption per unit product ($MJ\cdot kg^{-1}$)
山西浮山 Fushan, Shanxi	有机 Organic	33 800	3.0	0.9	1.8	0.35
	常规 Conventional	48 800	15.9	13.7	14.6	1.98
陕西白水 Baishui, Shaanxi	有机 Organic	37 500	41.1	13.1	35.0	8.48
	常规 Conventional	37 500	18.0	18.0	18.0	3.25
甘肃天水 Tianshui, Gansu	有机 Organic	45 000	21.7	7.0	19.5	2.77
	常规 Conventional	41 300	17.9	5.4	18.4	2.02

2.2　环境影响评价清单分析

有机及常规苹果生命周期的环境影响清单见表 4。3 地农资系统单位产品的能源消耗均为有机模式远远低于常规模式；而农作系统中，陕西白水有机模式能源消耗低于常规，山西浮山和甘肃天水则相反。就 3 地而言，常规生产过程中能源消耗主要发生在农资系统，其中山西浮山占 98.1%，陕西白水 69.9%，甘肃天水 99.2%；而有机生产过程中能源消耗呈现不同结果，山西浮山农资系统仅占比 11.0%，陕西白水占 55.5%，而甘肃天水占 89.5%。

从全球变暖角度分析，单位产品对全球变暖的影响仅山西浮山有机低于常规(有机为常规的 23%)，而陕西白水和甘肃天水有机高于常规，有机苹果分别是常规苹果的 3.37 倍和 1.42 倍。因而，总的全球变暖影响，常规和有机生产方式都是陕西白水>甘肃天水>山西浮山，但常规生产方式下 3 地差距不明显。3 个地区的温室气体排放来源都主要集中在农作系统。山西浮山农作系统有机低于常规，而陕西白水和甘肃天水有机高于常规；农资系统呈现统一的规律，有机高于常规。

对单位产品产生的环境酸化分析表明，有机和常规生产都表现为陕西白水>甘肃天水>山西浮山，与全球变暖类似，在常规生产模式下差别不明显。不同地区存在差异，仅山西浮山的农作系统和农资系统呈现常规高于有机，陕西白水和甘肃天水都是有机产生的环境酸化高于常规。环境酸化主要集中在农作系统(陕西白水有机模式除外)。

单位产品造成的富营养化：陕西白水影响最大，甘肃天水次之，山西浮山影响最小，有机和常规方式均表现为农作系统影响大。山西浮山为常规大于

表 4　不同地区单位产品有机及常规苹果生命周期的环境影响清单

Table 4　Life cycle environmental impacts for per unit product of organic and conventional apple production in different experiment locations

环境影响类型 Environmental impact	生产方式 Cultivation pattern	山西浮山 Fushan, Shanxi 农资系统 Inputs	农作系统 Farming	小计 Sum	陕西白水 Baishui, Shaanxi 农资系统 Inputs	农作系统 Farming	小计 Sum	甘肃天水 Tianshui, Gansu 农资系统 Inputs	农作系统 Farming	小计 Sum
能源消耗 Energy consumption ($MJ\cdot Mg^{-1}$)	有机 Organic	35	314	349	471	377	848	248	28.9	277
	常规 Conventional	1 940	37	1 977	2 271	975	3 246	2 008	14.4	2 023
全球变暖 Global warming ($kg\cdot Mg^{-1}$)	有机 Organic	2.1	9.3	11.4	65.3	127.0	193.0	13.6	67.3	80.9
	常规 Conventional	1.2	49.2	50.4	1.3	55.8	57.1	1.3	55.6	56.9
环境酸化 Environmental acidification ($kg\cdot Mg^{-1}$)	有机 Organic	0.29	0.63	0.92	8.82	8.66	17.5	1.84	4.57	6.41
	常规 Conventional	1.22	3.34	4.56	1.41	3.79	5.20	1.28	3.78	5.06
富营养化 Eutrophication ($kg\cdot Mg^{-1}$)	有机 Organic	0.05	0.14	0.19	1.55	1.90	3.45	0.32	1.00	1.32
	常规 Conventional	0.11	0.73	0.84	0.12	0.83	0.96	0.12	0.83	0.95

有机，有机仅占常规的 22%，陕西白水和甘肃天水农作和农资系统都表现为有机模式影响较大。

2.3 综合环境影响分析

经过标准化和加权评估后，各地、不同生产模式单位产品的环境影响结果见表 5。山西浮山有机生产模式较常规生产的环境影响小，而陕西白水和甘肃天水表现为有机生产模式>常规生产。整体上，常规生产和有机生产模式下的苹果生产，陕西白水环境综合影响最大，甘肃天水次之，山西浮山最小。造成该结果的主要原因在于，与陕西白水和甘肃天水相反，山西浮山的有机生产模式比常规生产有更低的肥料投入以及能量投入，因此污染物排放以及能源消耗在有机模式下较小。3 个地区的环境影响主要集中在富营养化方面(占 81%以上)，这与其较高的肥料投入以及耕作系统 N 素淋失和挥发有关。

表 5 不同地区单位产品有机及常规苹果生命周期环境影响评估结果
Table 5 Evaluation results of total impacts of per unit product of organic and conventional apple production on environment in different experiment locations

环境影响类型 Environmental impact	生产方式 Cultivation pattern	山西浮山 Fushan, Shanxi			陕西白水 Baishui, Shaanxi			甘肃天水 Tianshui, Gansu		
		农资系统 Inputs	农作系统 Farming	小计 Sum	农资系统 Inputs	农作系统 Farming	小计 Sum	农资系统 Inputs	农作系统 Farming	小计 Sum
能源消耗 Energy consumption	有机 Organic	3.78E-06	3.40E-05	3.78E-05	5.09E-05	4.07E-05	9.16E-05	2.68E-05	3.12E-06	2.99E-05
	常规 Conventional	2.10E-04	3.97E-06	2.14E-04	2.45E-04	1.05E-04	3.51E-04	2.17E-04	1.55E-06	2.19E-04
全球变暖 Global warming	有机 Organic	7.09E-05	3.11E-04	3.81E-04	2.19E-03	4.27E-03	6.46E-03	4.56E-04	2.25E-03	2.71E-03
	常规 Conventional	3.85E-05	1.65E-03	1.69E-03	4.46E-05	1.87E-03	1.91E-03	4.21E-05	1.86E-03	1.90E-03
环境酸化 Environmental acidification	有机 Organic	1.32E-03	2.91E-03	4.23E-03	4.08E-02	4.00E-02	8.08E-02	8.49E-03	2.11E-02	2.96E-02
	常规 Conventional	5.62E-03	1.55E-02	2.11E-02	6.54E-03	1.75E-02	2.41E-02	5.90E-03	1.75E-02	2.34E-02
富营养化 Eutrophication	有机 Organic	6.08E-03	1.67E-02	2.28E-02	1.88E-01	2.30E-01	4.17E-01	3.91E-02	1.21E-01	1.60E-01
	常规 Conventional	1.30E-02	8.87E-02	1.02E-01	1.51E-02	1.01E-01	1.16E-01	1.42E-02	1.00E-01	1.14E-01
加权 Weighting	有机 Organic	7.48E-03	2.00E-02	2.75E-02	2.31E-01	2.74E-01	5.05E-01	4.81E-02	1.45E-01	1.93E-01
	常规 Conventional	1.89E-02	1.06E-01	1.25E-01	2.19E-02	1.20E-01	1.42E-01	2.03E-02	1.20E-01	1.40E-01

3 讨论

有机农业以可持续发展为核心，通过减少化学和外部资源和能源投入，尽可能采用本地化、物理和生物技术，实现农业生态系统的养分循环和高效能量利用，减少化学品和外部特别是不可再生能源的使用，从长远和整体范围上，有机农业的生态环境保护功能特别值得重视[23-24]。比较常规农业和有机农业的环境影响，按照大类可以分为 1)减少农(兽)药使用，2)减少化肥使用，3)固碳减排，4)增加农业生物多样性，5)减少氮素淋失，降低对地下水污染，6)提高能源利用效率，降低产品能源使用量，7)降低产量等[25-29]。

本研究的 3 个地区中，两个地区(陕西白水和甘肃天水)的有机和常规苹果产量相当，而山西浮山的有机苹果产量为常规的 69%。造成这个结果的主要原因在于肥料投入的差别，山西浮山有机苹果生产的 N、P 和 K 养分投入大约是常规的 6.8%~18.8%，而另外两个地区有机则是常规的 72.7%~228.8%，说明在高量有机养分投入的前提下，有机农业可以达到和常规农业相当的作物产量，这在其他研究中[28]也可以得到验证。

虽然有机农业和常规农业在高投入条件下，可以实现相当的产量水平，但是其养分利用效率、能源利用效率和环境影响则呈现不同的情形[30]。由于山西浮山有机苹果生产的肥料投入远低于常规评估生产，而另外两个农场有机和常规苹果生产相当甚至有机高于常规，造成山西浮山的有机苹果养分利用效率高于常规苹果生产，而另外两地则是有机苹果生产低于常规苹果生产。3 地区相比较，不论是有机和常规苹果生产，都是山西浮山高于甘肃天水，陕西白水的养分利用效率最低，这和当地农民种植习惯有直接关系。陕西白水的果农特别重视肥料投入，以确保高产、稳产。就能源利用效率分析，由于化肥的能耗远高于有机肥，造成常规苹果生产能源消耗都高于有机苹果生产，因而有机苹果生产能源利用效率都高于常规苹果生产。3 地区比较，由于陕西白水的化肥使用量最高，而苹果产量差异并不大，就常规苹果生产而言，其能源利用效率表现为山西浮山>甘肃天水>陕西白水；在有机苹果生产中，山西浮山和陕

西白水的人力和灌溉能源消耗大于甘肃天水，能源利用效率方面，甘肃天水>山西浮山>陕西白水。

本文对于苹果生产的环境影响，从能源消耗、全球变暖效应、环境酸化和富营养化 4 个方面进行分析。同样，由于山西浮山有机苹果的肥料等投入远低于常规苹果生产，产量相差不大，因而表现为有机苹果的综合环境影响仅为常规苹果的 22%，陕西白水和甘肃天水呈现相反的情形，其有机苹果的综合环境影响分别是常规苹果的 355%和 138%。该研究结果和李彩恋等[11]的研究不尽相同，主要原因在于后者的有机产量低于常规作物产量。3 个地区相比较，有机和常规苹果的综合环境影响都表现为陕西白水>甘肃天水>山西浮山。其中，富营养化是综合环境影响的主要构成(81%~83%)，其次是环境酸化(15%~17%)，其他学者在冬小麦[7]、蔬菜[31]也得到了类似的结果。这说明当前我国农业整体上已经进入了集约化程度较高的阶段，当前农业发展的调整重点是降低化肥和农药等化学品的投入。

此外，由于有机肥的生产和使用过程也会产生重要的环境影响，比如肥料堆制过程中和使用到土壤后都会有 NH_3 挥发以及温室气体 N_2O、CH_4 的产生[32]，某些情况下其环境影响甚至高于常规农业生产，如陕西白水和甘肃天水，因此在当前国家提倡调整农业发展模式的情况下，有机农业的环境影响也应当得到重视。况且当前我国有机农业生产中，绝大部分的 N 肥最终来自于化工行业，而不是来源于豆科作物固氮等天然途径[33]。从这个意义上分析，有机农业的推广应该在可行的范围内进行，而不是一哄而上。

4 结论

本研究从苹果生产全过程的角度进行分析，对不同地区有机和常规苹果的生产和主要环境影响进行了综合评价。研究发现，有机和常规苹果生产中，决定产量、养分利用效率、能源利用效率和综合环境影响的主要因素在于有机肥和化肥的投入水平。在高量有机养分投入的前提下，有机农业可以达到和常规农业相当的作物产量，但其代价是较高的负面环境影响和较低的养分和能源利用效率。3 个地区有机及常规苹果生产的综合环境影响均为陕西白水最大，甘肃天水次之，山西浮山最小。富营养化占综合环境影响比值最大，超过 81%。山西浮山有机苹果生产的肥料投入远低于常规生产，其综合环境影响仅为常规生产方式的 22%，而陕西白水和甘肃天水相反，分别为 355%和 138%。农民种植习惯，对于肥料投入以及能源投入也有较大影响。不论是有机还是常规苹果生产，都面临着提高养分和能源利用效率等的挑战。

参考文献 References

[1] Guo X L, Ni M F, Lin W P, et al. The review and summary of the research on life cycle assessment[J]. Advanced Materials Research, 2012, 347–353: 2768–2772

[2] 郑秀君, 胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J]. 科技进步与对策, 2013, 30(6): 155–160
Zheng X J, Hu B. Domestic literature review and the latest overseas research progress of life cycle assessment[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2013, 30(6): 155–160

[3] Kalhor T, Rajabipour A, Akram A, et al. Environmental impact assessment of chicken meat production using life cycle assessment[J]. Information Processing in Agriculture, 2016, 3(4): 262–271

[4] Koffler C, Rohde-Brandenburger K. On the calculation of fuel savings through lightweight design in automotive life cycle assessments[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010, 15: 128–135

[5] Brentrup F, Kü sters J, Kuhlmann H, et al. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology Ⅰ. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 20(3): 247–264

[6] 王效琴, 吴庆强, 周建斌, 等. 设施番茄生产系统的环境影响生命周期评价[J]. 环境科学学报, 2014, 34(11): 2940–2947
Wang X Q, Wu Q Q, Zhou J B, et al. Life cycle assessment of tomato production in greenhouses[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(11): 2940–2947

[7] 王明新, 包永红, 吴文良, 等. 华北平原冬小麦生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1127–1132
Wang M X, Bao Y H, Wu W L, et al. Life cycle environmental impact assessment of winter wheat in North China Plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(5): 1127–1132

[8] 徐杰峰, 王小文, 王乐力, 等. 中国橡胶种植生命周期评价研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 172–180
Xu J F, Wang X W, Wang L L, et al. Assessment of natural rubber plantation life cycle in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(1): 172–180

[9] Meng F Q, Qiao Y H, Wu W L, et al. Environmental impacts and production performances of organic agriculture in China: A monetary valuation[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 188: 49–57

[10] 罗燕, 乔玉辉, 吴文良. 东北有机及常规大豆对环境影响的生命周期评价[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7170–7178
Luo Y, Qiao Y H, Wu W L. Environment impact assessment of organic and conventional soybean production with LCA method in China Northeast Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7170–7178

[11] 李彩恋, 赵桂慎, 王一超, 等. 华北地区有机及常规草莓生

产对环境影响的生命周期评价[J]. 中国农学通报, 2015, 31(23): 102–108
Li C L, Zhao G S, Wang Y C, et al. Environmental impact of organic and conventional strawberry production in North China based on life cycle assessment[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(23): 102–108

[12] 李贞宇, 王旭, 魏静, 等. 我国不同区域玉米施肥的生命周期评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30(9): 1912–1920
Li Z Y, Wang X, Wei J, et al. Life cycle assessment of fertilization in corn production in different regions of China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(9): 1912–1920

[13] Henriksson P J G, Guinée J B, Kleijn R, et al. Life cycle assessment of aquaculture systems — A review of methodologies[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17(3): 304–313

[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19630.1—2011 有机产品 第 1 部分: 生产[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration Committee. GB/T 19630.1—2011 Organic Products — Part 1: Production[S]. Beijing: China Standards Press, 2012

[15] 梁龙, 陈源泉, 高旺盛. 我国农业生命周期评价框架探索及其应用——以河北栾城冬小麦为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(5): 154–160
Liang L, Chen Y Q, Gao W S. Framework study and application of agricultural life cycle assessment in China: A case study of winter wheat production in Luancheng of Hebei[J]. China Population, Resources and Environment, 2009, 19(5): 154–160

[16] 王寿兵, 王如松, 吴千红. 生命周期评价中资源耗竭潜力及当量系数的一种算法[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2001, 40(5): 553–557
Wang S B, Wang R S, Wu Q H. A new approach to calculate resource depletion potential and its equivalency factors in life cycle assessment[J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2001, 40(5): 553–557

[17] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 143–148
Qing X B, Li Y E, Liu K Y, et al. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(7): 143–148

[18] 梁龙. 基于 LCA 的循环农业环境影响评价方法探讨与实证研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2009: 35–38
Liang L. Environmental impact assessment of circular agriculture based on life cycle assessment: Methods and case studies[D]. China Agricultural University, 2009: 35–38

[19] 梁龙, 陈源泉, 高旺盛. 基于生命周期的循环农业系统评价[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2795–2803
Liang L, Chen Y Q, Gao W S. Integrated evaluation of circular agriculture system: A life cycle perspective[J]. Environmental Science, 2010, 31(11): 2795–2803

[20] 籍春蕾, 丁美, 王彬鑫, 等. 基于生命周期分析方法的化肥与有机肥对比评价[J]. 土壤通报, 2012, 43(2): 412–417
Ji C L, Ding M, Wang B X, et al. Comparative evaluation of chemical and organic fertilizer on the base of life cycle analysis methods[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(2): 412–417

[21] 胡玉婷, 廖千家骅, 王书伟, 等. 中国农田氮淋失相关因素分析及总氮淋失量估算[J]. 土壤, 2011, 43(1): 19–25
Hu Y T, Liao Q J H, Wang S W, et al. Statistical analysis and estimation of N leaching from agricultural fields in China[J]. Soils, 2011, 43(1): 19–25

[22] 王桂良. 中国三大粮食作物农田活性氮损失与氮肥利用率的定量分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
Wang G L. Quantitative analysis of reactive nitrogen losses and nitrogen use efficiency of three major grain crops in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014

[23] Committee on Twenty-First Century Systems Agriculture, National Research Council. Toward Sustainable Agricultural Systems in the 21st Century[M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2010

[24] Meier M S, Stoessel F, Jungbluth N, et al. Environmental impacts of organic and conventional agricultural products — Are the differences captured by life cycle assessment?[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 149: 193–208

[25] Schader C, Stolze M, Gattinger A. Environmental performance of organic farming[M] //Boye I J, Arcand Y. Green Technologies in Food Production and Processing. Boston, MA: Springer, 2012: 183–210

[26] Tuomisto H L, Hodge I D, Riordan P, et al. Does organic farming reduce environmental impacts? — A meta-analysis of European research[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 112: 309–320

[27] Reganold J P, Wachter J M. Organic agriculture in the twenty-first century[J]. Nature Plants, 2016, 2: 15221

[28] Crowder D W, Reganold J P. Financial competitiveness of organic agriculture on a global scale[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(24): 7611–7616

[29] Seufert V, Ramankutty N, Foley J A. Comparing the yields of organic and conventional agriculture[J]. Nature, 2012, 485(7397): 229–232

[30] Halberg N. Energy use and greenhouse gas emission in organic agriculture[C]//International Conference Organic Agriculture and Climate Change. France: Enita of Clermont, 2008

[31] 郭金花. 典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命周期评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2016: 61–65
Guo J H. Inputs of irrigation water, fertilizers, pesticides to and life cycle assessment of environmental impacts from typical greenhouse vegetable production systems in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016: 61–65

[32] Nemecek T, Dubois D, Huguenin-Elie O, et al. Life cycle assessment of Swiss farming systems: Ⅰ. Integrated and organic farming[J]. Agricultural Systems, 2011, 104(3): 217–232

[33] Oelofse M, Høgh-Jensen H, Abreu L S, et al. A comparative study of farm nutrient budgets and nutrient flows of certified organic and non-organic farms in China, Brazil and Egypt[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 87(3): 455–470